



Zoom sur la violation de CP à l'occasion des résultats obtenus par les expériences BABAR et BELLE

N. Arnaud, A. Höcker

► To cite this version:

N. Arnaud, A. Höcker. Zoom sur la violation de CP à l'occasion des résultats obtenus par les expériences BABAR et BELLE. 2005. in2p3-00024020

HAL Id: in2p3-00024020

<https://hal.in2p3.fr/in2p3-00024020>

Preprint submitted on 12 Apr 2005

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Zoom sur la violation de CP à l'occasion des résultats récents obtenus par les expériences BABAR et Belle

par Nicolas Arnaud¹ et Andreas Höcker²

Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire
IN2P3-CNRS et Université de Paris-Sud, BP 34, F-91898 Orsay Cedex

En août dernier, les expériences BABAR et Belle ont annoncé presque simultanément la découverte d'une « *différence spectaculaire entre matière et antimatière* ». Cette information a été immédiatement relayée sous forme de communiqués de presse avant d'être présentée à la Conférence Internationale de Physique des Hautes Energies (ICHEP 2004) à Pékin deux semaines plus tard.

- <http://www2.cnrs.fr/presse/communiqu/523.htm>
(BABAR, communiqué de presse CNRS du 2 août 2004) ;
- http://www.kek.jp/intra-e/press/2004/Bellepress_0408.pdf
(Belle, communiqué de presse du 4 août 2004).

En termes plus scientifiques, on parle de « *mise en évidence de la violation de CP directe dans le système des mésons B* ». Quelle est l'importance de ce résultat ? Pour la mesurer, il suffit de remarquer que le communiqué de presse du CNRS n'est que le troisième portant sur l'expérience BABAR, alors que celle-ci prend des données depuis la fin de l'année 1999 et qu'elle a publié plus de cent articles dans des revues internationales ! Quarante ans après la première observation de la violation de CP dans le secteur des kaons, cette nouvelle avancée dans l'étude des constituants élémentaires de la matière intervient après une décennie particulièrement riche en découvertes dans ce domaine. Le moment paraît donc bien choisi pour faire le point sur ces recherches afin de replacer les résultats récents dans leur contexte, aussi bien historique que scientifique. Même si la violation de CP observée dans la nature est un effet fin, les enjeux scientifiques liés à la compréhension de ce phénomène sont essentiels ce qui explique pourquoi tant d'expérimentateurs et de théoriciens s'y sont intéressés depuis près d'un demi-siècle.

Qu'est-ce que la symétrie CP ?

Importance des symétries en physique

Une des avancées conceptuelles majeures de la physique des XIX^e-XX^e siècles a été de comprendre à quel point la notion de symétrie était au coeur des théories modernes. Écrire une équation invariante sous une classe de transformations particulières (translations ou rotations par exemple) ne simplifie pas seulement le problème étudié. Traduite en langage mathématique, la symétrie permet de construire une quantité qui est *conservée* au cours de l'évolution du processus gouverné par cette équation. Ce théorème a été démontré en toute généralité par la mathématicienne allemande Emmy Noether en 1915. En mécanique quantique, les particules élémentaires (les fermions, regroupés en trois familles formées chacune d'un lepton, d'un neutrino et de deux quarks) sont décrites par un petit ensemble de nombres (charge, spin, etc.) qui ne peuvent prendre que des valeurs discrètes, entières ou fractionnaires – ces quantités sont dites « quantifiées ».

¹ e-mail : narnaud@lal.in2p3.fr

² e-mail : hoecker@lal.in2p3.fr

Prenons un autre exemple : la théorie de la Relativité Restreinte est née en 1905 de la recherche d'une loi de changement de référentiel – connue aujourd'hui sous le nom de transformation de Lorentz – qui assure l'invariance de la vitesse de la lumière dans le vide. Ce principe de relativité (aucun endroit de l'espace, aucun point de vue n'est privilégié) s'est révélé particulièrement fécond puisque son application dans un cadre plus général a donné naissance à la Relativité Générale dix ans plus tard. Les prédictions de cette théorie accessibles à l'expérience n'ont jamais été prises en défaut depuis quatre-vingt-dix ans. La Relativité Générale permet de décrire précisément le système solaire aussi bien que l'Univers dans son ensemble ; elle est également utilisée, par exemple, pour des corrections fines du système de positionnement global GPS.

<i>Symétrie</i>	Invariance par déplacement dans le temps	Homogénéité de l'espace	Isotropie de l'espace
<i>Transformations</i>	Translations dans le temps	Translations d'espace	Rotations d'espace
<i>Quantité conservée</i>	Énergie	Quantité de mouvement	Moment cinétique

Exemple de quantités conservées en présence de symétries données.

Les trois symétries suivantes sont fondamentales en physique des particules.

- La parité P : il s'agit de la réflexion de l'espace autour d'un centre arbitraire. Si P est conservée, cela signifie que les lois de la physique microscopique ne font aucune différence entre la gauche et la droite, le haut et le bas, l'avant et l'arrière.
- La transformation particule-antiparticule³ C : cette transformation change tout nombre quantique additif (par exemple la charge électrique), en son opposé : ainsi, par C, un électron devient un positon et vice versa.
- L'inversion du temps T : on renverse le sens du temps dans les équations. Supposons la symétrie T valable ; si un mouvement donné est permis par les lois de la physique, alors le mouvement en sens contraire l'est également.

Aujourd'hui, « l'invariance CPT » est un principe de base de la théorie quantique des champs : appliqués séquentiellement, la transformation particule-antiparticule, la parité et le renversement du temps constituent une symétrie exacte, satisfaite par les trois interactions fondamentales, électromagnétique, faible et forte, auxquelles les particules élémentaires sont sensibles. G. Lüders, W. Pauli (Prix Nobel de Physique 1945) et J. Schwinger (Prix Nobel de Physique 1965) ont démontré en 1954 que ce résultat découle de l'invariance des théories quantiques sous les transformations de Lorentz définies en Relativité Restreinte. Les conséquences du « théorème CPT » sont fondamentales : relation entre le spin d'une particule et son comportement statistique⁴ ; masses et durées de vie identiques pour les particules et les anti-particules ; nombres quantiques opposés pour les anti-particules par rapport aux particules correspondantes.

³ Également appelée « conjugaison de charge ».

⁴ Ce « théorème spin-statistique » postule que les champs de particules à spin entier commutent (et sont alors quantifiés comme des « bosons », champs indiscernables, obéissant à la statistique de « Bose-Einstein »), alors que les champs des particules de spin demi-entier anti-commutent (quantifiés comme des « fermions », champs antisymétriques sous échange de particules, obéissant à la statistique de « Fermi-Dirac » et par conséquent au principe d'exclusion de Pauli qui impose que deux fermions ayant les mêmes nombres quantiques ne peuvent pas « cohabiter » au même endroit).

Pendant longtemps, on a supposé que les symétries C, P et T (prises séparément) étaient également respectées par les trois interactions fondamentales. En fait, il n'en est rien : en 1956, les théoriciens T-D. Lee et C. N. Yang se trouvent confrontés à des résultats expérimentaux troublants concernant des « particules étranges »⁵. En cherchant à les expliquer, ils en viennent à se demander si la parité ne peut pas être violée par l'interaction faible ; ils observent alors que la conservation de cette symétrie n'a pas encore été vérifiée expérimentalement. En effet, les recherches de violation de P ont été menées dans des processus dominés par l'interaction forte et la précision des mesures n'est pas suffisante pour accéder aux désintégrations gouvernées par l'interaction faible – beaucoup plus rares. Ils proposent donc une série d'expériences permettant de tester de manière non ambiguë la conservation de la parité dans ces processus. Entre fin 1956 et début 1957, C. Wu⁶ et ses collaborateurs démontrent que la parité est violée dans un processus de radioactivité β : la désintégration $^{60}\text{Co} \rightarrow ^{60}\text{Ni} + e^- + \bar{\nu}_e$ où l'électron est majoritairement émis dans la direction opposée au spin du noyau ^{60}Co . La parité est même maximale violée dans ce type de désintégration faible, appelé « courant chargé ». L'expérience étant directement inspirée des travaux de Lee et Yang, ceux-ci partagent le Prix Nobel de Physique dès la fin de 1957.



Les prix Nobel de physique 1957 Tsung-Dao Lee (à gauche) et Chen Ning Yang (à droite) encadrant Chien-Shiung Wu.

R. Garwin, L. Lederman et M. Weinrich (GLW) ont confirmé presque immédiatement les résultats de l'expérience de Wu en analysant la chaîne de désintégration des pions chargés (là encore due à l'interaction faible), $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$, le muon créé se désintégrant ensuite selon la réaction $\mu^+ \rightarrow e^+ + \bar{\nu}_\mu + \nu_e$. En effet, si P est violée, le muon produit lors de la désintégration du pion est polarisé, propriété qui se « transmet » ensuite au positon. La mise en évidence de ce phénomène est directe : les positons ne sont pas émis de manière isotrope : en particulier, on doit en détecter plus « vers l'arrière » que « vers l'avant » – ces deux directions étant définies par rapport à la propagation des muons. Les mesures de GLW sont en parfait accord avec l'hypothèse de non-conservation de la parité.

⁵ Expérimentalement, deux mésons (assemblages de deux quarks), appelés à l'époque le τ^+ et le θ^+ , ont une masse et une durée de vie très proches, mais une parité opposée. Si P est une symétrie exacte, ces deux particules sont distinctes ; dans ce cas, comment expliquer leurs propriétés voisines ? Dans les années 1950, ce problème est connu comme le « puzzle τ - θ » ; en fait, les mésons τ^+ et θ^+ se sont révélés être une seule et même particule, le kaon K^+ , représentant de la famille des « particules étranges ». Ces dernières ont été découvertes dans les années 1940 sur des plaques photographiques impressionnées par des rayons cosmiques. Leur nom générique vient du fait que leur comportement ne ressemblait pas à ceux des particules connues à l'époque. Aujourd'hui, on sait que cette différence est due à la présence d'un quark alors inconnu, bien évidemment appelé « strange » par la suite.

⁶ C. Wu (1912-1997) n'a jamais obtenu de prix Nobel pour sa découverte. Par contre, en plus des nombreuses distinctions qui lui ont été accordées pour ses recherches, elle a eu le privilège d'être la première personne dont le nom a été donné à un astéroïde de son vivant.

Finalement, T-D. Lee, R. Oehme et C. N. Yang démontrent en 1957 que l'observation de GLW implique non seulement une violation de P mais également celle de C.

C et P ne sont donc pas des symétries exactes pour l'interaction faible ; qu'en est-il alors de leur produit CP ?

La symétrie CP

La brisure de la symétrie CP introduit une distinction entre matière et antimatière. Pour transformer l'une dans l'autre, il faut non seulement passer de la particule à l'antiparticule (C), mais aussi effectuer une réflexion d'espace (P). Ce principe est illustré sur la figure ci-dessous : « l'anti-main » n'est pas seulement le négatif de la « main », sa chiralité doit aussi être inversée par une réflexion dans un miroir. Alors que les symétries C et P sont largement violées, la symétrie CP est *presque* exacte : les manifestations de sa violation sont le plus souvent des effets fins.

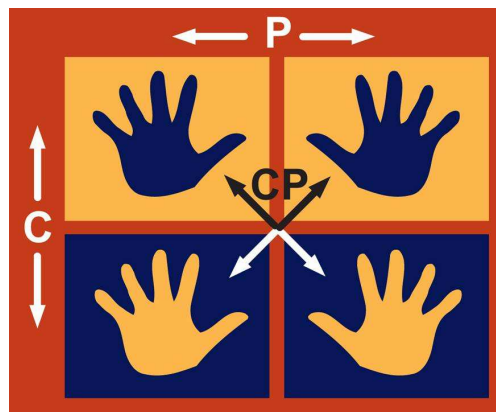


Illustration « avec les mains » de la transformation CP (© Bob Cahn, LBNL).

Pour décrire la violation de CP, il est nécessaire de se rappeler que l'on connaît aujourd'hui six quarks différents, distingués selon leur « saveur » et désignés par une lettre. Les quarks u (pour « up »), c (« charm »), t (« top ») ont une charge $+2/3$ (l'unité étant la charge du proton) tandis que les quarks d (« down »), s (« strange ») et b (« bottom ») ont une charge $-1/3$. Un mélange de saveurs apparaît chez les quarks parce que leurs états quantiques de masse (les « quarks » qui se créent, se propagent puis se désintègrent) ne sont pas les mêmes que leurs états quantiques de saveur (les « quarks » sur lesquels l'interaction faible s'applique). Ce phénomène relie les quarks des différentes familles via le courant chargé de l'interaction faible et se trouve à l'origine du mélange des mésons neutres, par exemple les oscillations $K^0 \leftrightarrow \bar{K}^0$ et $B^0 \leftrightarrow \bar{B}^0$.

De manière générale, le mélange de saveurs introduit dans la théorie des degrés de liberté supplémentaires sous la forme d'une matrice de rotation V de dimension N , N étant le nombre de familles de quarks. Par convention, cette matrice mélange les saveurs des quarks de charge négative pour obtenir les états quantiques sur lesquels l'interaction faible s'applique. V doit satisfaire à une condition dite d'unitarité, ce qui limite le nombre de ses paramètres libres.

L'unitarité est simplement la traduction mathématique d'un principe général qui veut que, lors d'une désintégration, son « contenu initial » se retrouve – après transformation – dans ses « produits ». Cette condition est obligatoire pour que la théorie ait un sens. En mécanique quantique, elle correspond au fait que la norme d'un vecteur d'état ne change pas au cours de son évolution temporelle.

En notation matricielle, elle se traduit par $V^\dagger V = I_N$ où † signifie « hermitien conjugué » et où I_N est la matrice identité de dimension N . On peut représenter cette égalité matricielle dans le plan complexe par $N^2 - N$ lignes brisées faites chacune de N segments. L'unitarité demande que ces lignes se referment toutes pour former des polygones, dits d'unitarité.

Pour conclure cette digression, intéressons-nous par exemple au cas $N=3$ familles. A priori, la matrice V possède alors 18 inconnues réelles. Les 9 conditions d'unitarité (dont 6 permettent de construire des triangles d'unitarité) réduisent ce nombre de moitié. Sur ces 9 paramètres, 5 sont des phases arbitraires dont on peut fixer la valeur. Finalement, il ne reste que 4 inconnues : 3 angles de rotation et 1 phase.

Avant de faire apparaître le lien entre le mélange des quarks et la violation de CP, revenons un instant sur ce dernier phénomène. Il est commode de classer ces manifestations en trois catégories.

- La violation de CP dans le mélange (souvent appelée violation de CP indirecte), qui est due au fait que les états propres de masse de mésons neutres ne sont pas identiques aux états propres de CP.
- La violation de CP directe qui apparaît lorsqu'un processus $I \rightarrow F$ a un taux différent de « l'anti-processus » mettant en jeu les antiparticules correspondantes⁷ $\bar{I} \rightarrow \bar{F}$, obtenu après application de la transformation CP. C'est un phénomène d'interférence entre plusieurs amplitudes complexes (mettant en jeu des phases faibles et fortes⁸) décrivant mathématiquement ces désintégrations. Pour l'un des processus, ces interférences sont constructives – son taux (= son intensité) est amplifié – alors que pour l'anti-processus, elles sont destructives – la désintégration est plus rare.
- La violation de CP dans l'interférence entre désintégrations avec ou sans mélange. Considérons un état final f_{CP} , invariant sous la transformation CP^9 , dans lequel un méson (B^0 par exemple) et son antiparticule (\bar{B}^0) peuvent se désintégrer : $B^0 \rightarrow f_{CP}$ et $\bar{B}^0 \rightarrow f_{CP}$. Le mélange $B^0 \leftrightarrow \bar{B}^0$ interfère avec les désintégrations en f_{CP} et produit une asymétrie dépendante du temps entre les nombres de désintégrations $B^0 \rightarrow f_{CP}$ et $\bar{B}^0 \rightarrow f_{CP}$.

Bien que la violation de CP soit difficile à mettre en évidence, nous sommes une preuve vivante du fait que cette symétrie est brisée ! En effet, l'antimatière semble complètement absente de notre Univers : aussi loin qu'on l'observe, on ne détecte que de la matière. Comme ces deux espèces, une fois mises en présence, s'annihilent immédiatement en énergie, il a dû exister un léger déséquilibre entre elles lors du Big Bang (la baryogénèse).

Comme l'a montré le physicien Sakharov (célèbre dissident en URSS, Prix Nobel de la Paix 1975) en 1967, la baryogénèse implique l'existence de trois phénomènes dans les premiers instants de l'Univers. La première « condition de Sakharov » est la non conservation du nombre baryonique : des processus dont les réactifs et les produits ne comportent pas le même nombre de baryons¹⁰ ont eu lieu à cette époque. La seconde condition est justement la violation de CP, permettant de créer l'excès de matière. Enfin, troisième condition, les réactions mettant en œuvre les violations de CP et du nombre baryonique n'étaient pas à l'équilibre thermique.

⁷ Désignées par un « $\bar{}$ » de manière générique.

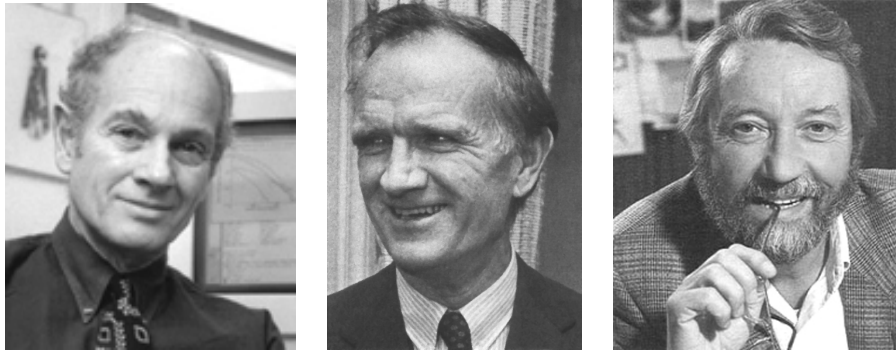
⁸ Une phase due à l'interaction faible est changée en son conjugué par application de CP tandis qu'une phase due à l'interaction forte est conservée par cette transformation.

⁹ Quand on applique à f_{CP} les deux transformations C et P, il se retrouve inchangé $CP|f_{CP}\rangle = \pm |f_{CP}\rangle$.

¹⁰ Les baryons (le proton et le neutron par exemple) sont des assemblages de trois quarks.

Brève histoire de la recherche de la violation de CP

L'histoire de la violation de CP couvre maintenant quatre décennies. Le phénomène a été mis en évidence pour la première fois en 1964 au laboratoire de Brookhaven près de New York par quatre physiciens étudiant les désintégrations des kaons neutres : J. Cronin, V. Fitch (tous deux Prix Nobel de Physique 1980 pour cette découverte), J. Christenson et R. Turlay (CFCT).



Les prix Nobel de Physique 1980 James Cronin (à gauche) et Val Fitch (au milieu) ; à droite leur collaborateur français René Turlay.

Ces mésons formés d'un quark d et d'un quark s , sont de deux types, différenciés par leur durée de vie : le K_S (pour « short ») vit cinq cents fois moins longtemps que le K_L (pour « long »). Si l'on dispose d'un faisceau de kaons, il suffit donc « d'attendre un peu » pour être certain de n'avoir plus que des K_L . Les K_S et les K_L sont la superposition (ou combinaison linéaire) d'un méson neutre K^0 et de son antiparticule \bar{K}^0 , oscillant en permanence l'un dans l'autre. Bien que le K_L soit classé « CP moins » ($CP|K_L\rangle = -|K_L\rangle$), CFCT ont observé que ce méson se désintègre en deux pions chargés – un état « CP plus » : $CP|\pi^+\pi^-\rangle = +|\pi^+\pi^-\rangle$ – une fois sur cinq cents environ (0.23%). Si la symétrie CP était vérifiée, cette désintégration serait interdite. La découverte de CFCT s'interprète dans le cadre de la violation de CP dans le mélange¹¹.

Le « mécanisme KM »

En 1973, M. Kobayashi et T. Masakawa (KM) proposent une explication du phénomène de violation de CP dans le cadre de la théorie de l'interaction faible. Ils reprennent le concept de mélange entre saveurs de quarks – introduit par Cabbibo (C) en 1963 pour expliquer les désintégrations des particules « étranges » en présence de deux générations de quarks.

KM montrent que la violation de CP équivaut à la présence d'un coefficient complexe à partie imaginaire non nulle dans la matrice de mélange des saveurs de quarks, appelée depuis V_{CKM} en l'honneur de ses « inventeurs ». A leur époque, seules deux familles de quarks sont connues et, pour $N \leq 2$, les coefficients de V_{CKM} peuvent être rendus réels, ce qui interdit toute violation de CP ! Cela conduit KM à introduire une troisième famille, prédiction confirmée expérimentalement quelques années plus tard. Dans la théorie CKM, composante fondamentale du Modèle Standard de la physique des particules, la violation de CP est une propriété *naturelle*, due à la présence de 6 saveurs de quarks

¹¹ En réalité, l'effet mesuré est une superposition de deux sources de violation de CP : dans le mélange et dans l'interférence entre désintégrations avec et sans mélange.

organisées en 3 familles. En tout, le Modèle Standard contient 19 paramètres fondamentaux dont la valeur n'est pas prédite. 4 de ces paramètres décrivent la matrice de mélange V_{CKM} .

Confirmation expérimentale du « mécanisme KM »

L'année suivant la publication de l'article de Kobayashi et Masakawa, M. Perl (Prix Nobel de Physique 1995) et son équipe découvrent le lepton τ au Stanford Linear Accelerator Center (SLAC), premier représentant de la troisième famille de fermions. En 1978, le quark b , premier quark de cette génération, est découvert à Fermilab près de Chicago par L. Lederman (Prix Nobel de Physique 1988 pour la découverte du neutrino muon en 1962) et ses collaborateurs.

Les études portant sur les mésons B se succèdent alors. En 1983, les expériences MAC et MARK-II mesurent la durée de vie des mésons B qui vaut 1.5×10^{-12} seconde environ. En 1987, l'expérience ARGUS découvre l'oscillation $B^0 \leftrightarrow \bar{B}^0$ dont elle mesure la période, de l'ordre de 2×10^{-12} seconde. Celle-ci est donc du même ordre de grandeur que la durée de vie. Ainsi, ces mésons ont le temps d'osciller avant de se désintégrer, ce qui fait de ce système un très bon candidat potentiel pour l'étude des phénomènes de violation de CP impliquant le mélange des mésons B .

Revenons aux kaons. En 1998, l'expérience CPLEAR au CERN obtient la première évidence expérimentale de la violation de la symétrie T en comparant l'évolution temporelle des probabilités de transition $K^0 \rightarrow \bar{K}^0$ et $\bar{K}^0 \rightarrow K^0$. Ce résultat était « attendu » : comme CP n'est pas une symétrie exacte, T ne doit pas l'être non plus si l'on veut maintenir l'invariance CPT. Les observations des violations de CP et de T dans le secteur des kaons neutres sont parfaitement compatibles avec l'hypothèse de conservation de CPT. L'année suivante, la violation de CP directe dans la désintégration des kaons neutres est découverte¹² par les expériences NA48 (CERN) et KTeV (Fermilab). Cet effet¹³ est environ six cents fois plus faible que la violation de CP dans le mélange, mise en évidence trente-cinq ans plus tôt par CFCT.

La même année, les « usines à B » et leurs expériences associées, BABAR à SLAC et Belle à KEKB (au Japon) commencent à prendre des données pour étudier la violation de CP dans le système des mésons B que BABAR et Belle découvrent en 2001 en mesurant une valeur non nulle pour la quantité $\sin(2\beta)$. Il s'agit d'une violation de CP dans l'interférence entre désintégrations avec ou sans mélange. Enfin, au cours de l'été 2004, la violation de CP directe est découverte dans ce même système des mésons B .

Les Usines à B et les expériences BABAR à SLAC et Belle à KEK

En complément des renseignements apportés sur les deux premières colonnes de la matrice CKM par les kaons, l'étude des mésons B par les expériences BABAR et Belle permet d'accéder à la troisième colonne et de quantifier l'accord entre le Modèle Standard (dans lequel toute la violation de CP est générée par la seule phase de la matrice CKM) et les mesures expérimentales. En particulier, la mesure

¹² Une indication de ce phénomène avait déjà été observée par la génération précédente d'expériences (NA31) quelques années plus tôt mais l'incertitude sur ces mesures était trop grande pour conclure.

¹³ Cette expérience distingue de manière absolue matière (K^0) et antimatière (\bar{K}^0). Ce test pourrait se révéler crucial à l'occasion d'une – hypothétique – rencontre avec un extraterrestre. En effet, serrer la main (ou le tentacule) d'une anti-créature (aussi amicale soit-elle) aurait des conséquences dramatiques pour les deux parties : une annihilation mutuelle ! Heureusement, il suffirait de comparer au préalable les résultats d'expériences sur les kaons effectuées dans les deux mondes pour savoir si nous pouvons leur « serrer la pince » sans risque.

de $\sin(2\beta)$ sur laquelle nous reviendrons dans la suite est actuellement le test le plus contraignant du mécanisme KM. La désintégration étudiée, $B^0 \rightarrow J/\Psi K_S$ également appelée « mode en or », est décrite avec une grande précision par la théorie.

Les accélérateurs les plus performants actuellement

La résonance $\Upsilon(4S)$, découverte en 1980 par l'expérience CLEO à une énergie de 10.58 GeV, est située juste au-delà du seuil de production de paires de mésons BB (la masse d'un méson B, neutre ou chargé, est d'environ 5.28 GeV/c²). Les collisionneurs PEP-II et KEKB opèrent à cette énergie en faisant entrer en collision des faisceaux d'électrons et de positons d'énergies différentes : 9.0 GeV et 3.1 GeV respectivement pour PEP-II. Cette asymétrie est voulue : elle permet de produire les paires BB « vers l'avant » des détecteurs. Comme ces mésons ne sont pas au repos, ils ont alors le temps de « voler » avant de se désintégrer, après un parcours d'un quart de millimètre en moyenne. Ainsi, on peut déterminer les positions de leurs vertex de désintégration, ingrédient essentiel pour mesurer l'oscillation $B^0 \leftrightarrow \bar{B}^0$ à tout instant.

En plus du challenge considérable représenté par le contrôle de faisceaux asymétriques, PEP-II et KEKB ont dû relever un autre défi : produire un nombre colossal de désintégrations BB, objectif nécessaire pour mesurer les paramètres CKM avec une bonne précision. Les deux accélérateurs ont brillamment suivi ce cahier des charges ambitieux : ils accumulent maintenant des événements à un rythme supérieur à leur design initial. Grâce à eux, BABAR a pu enregistrer 245 millions de paires BB jusqu'à l'été 2004 et Belle a fait encore mieux : presque 320 millions au 8 novembre 2004 ! Le taux d'événements enregistrés augmente sans cesse : ainsi, BABAR espère recueillir 18 millions de BB par mois de fonctionnement en 2005 et Belle 24 millions.

Le détecteur BABAR

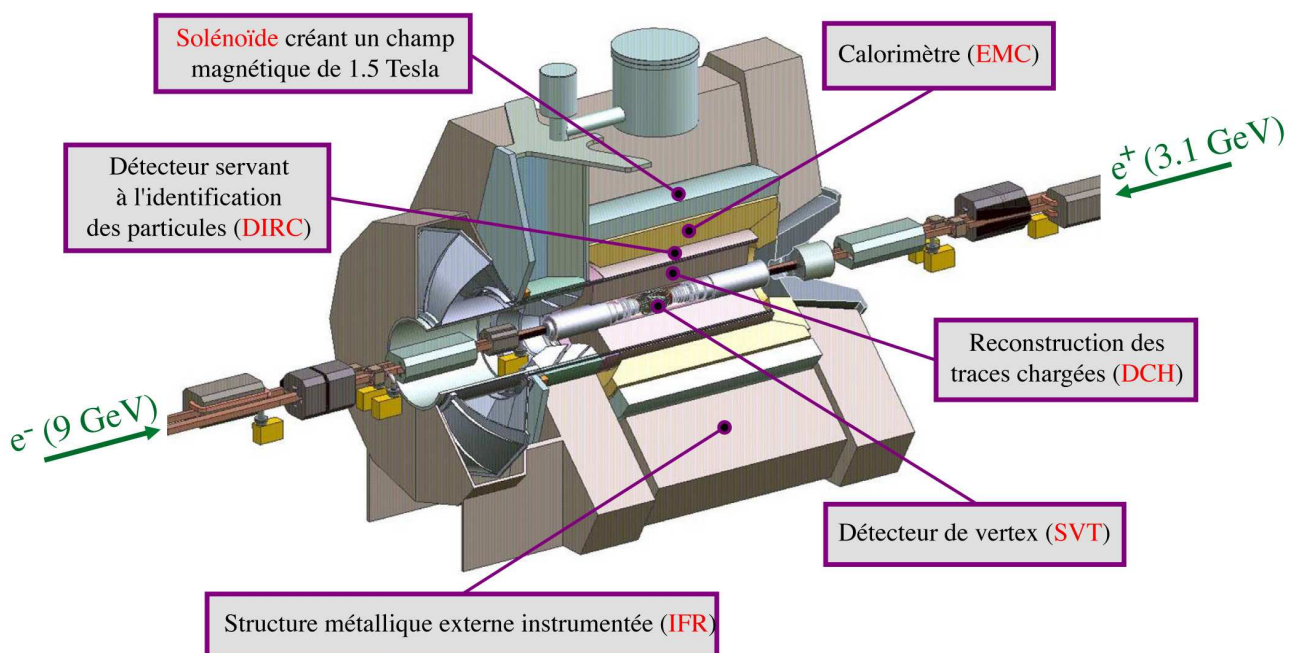
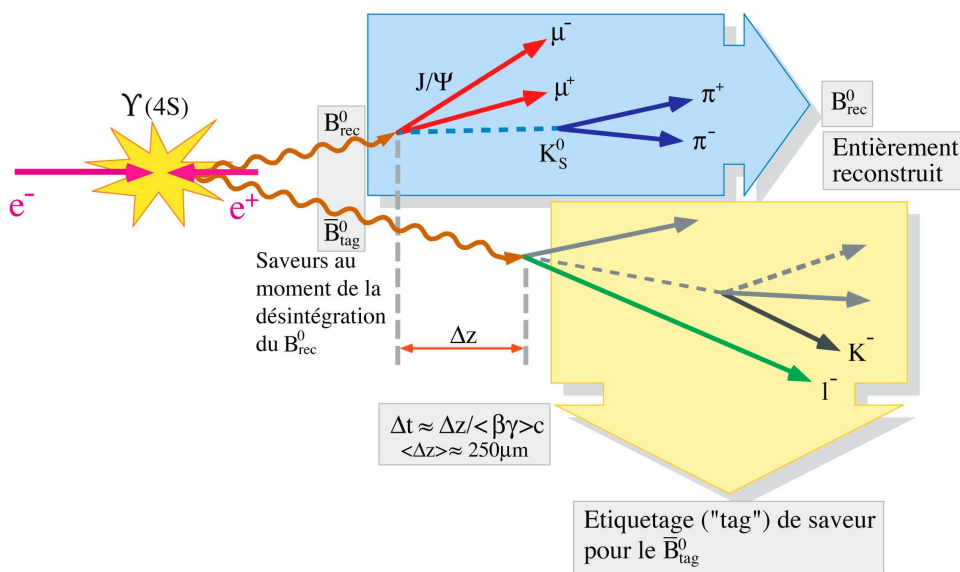


Schéma du détecteur BABAR.

Un schéma du détecteur BABAR est reproduit ci-dessus. Comme tous les détecteurs de physique des particules, il a une structure en forme de poupées russes, chaque couche tenant une place bien précise dans le système de mesure des particules produites lors des désintégrations. Les détecteurs SVT et DCH servent à la reconstruction des traces chargées tandis que le DIRC est un ingrédient essentiel de l'identification des particules (pion, kaon et proton). L'EMC est un calorimètre (c'est-à-dire un détecteur de dépôts d'énergie) électromagnétique, surtout sensible aux électrons et aux photons. Tous ces éléments baignent dans un champ magnétique de 1,5 Tesla orienté le long de l'axe des faisceaux. Il courbe les trajectoires des particules chargées ce qui permet de mesurer leur impulsion et le signe de leur charge. Enfin, une structure métallique externe, empilement de fer et de zones sensibles, appelée IFR, est utilisée pour l'identification des muons.

La figure suivante résume la stratégie d'analyse des événements $B^0\bar{B}^0$ de BABAR. Une propriété fondamentale des collisions e^+e^- est que les paires de mésons y sont produites de manière cohérente : malgré le mélange $B^0 \leftrightarrow \bar{B}^0$, il y a toujours exactement un B^0 et un \bar{B}^0 ! Historiquement, ce phénomène « d'intrication quantique » porte le nom de paradoxe Einstein-Podolsky-Rosen (EPR). Puisque la loi d'évolution des mésons B^0 est connue, il suffit d'identifier à un instant donné la saveur d'une des deux particules pour remonter à celle de l'autre méson, et ce à n'importe quel moment de son existence, entre sa création et sa désintégration.

Pour chaque événement sélectionné, on reconstruit le méson qui s'est désintégré selon le processus étudié. Ensuite, on cherche à déterminer la saveur de l'autre méson à partir de la charge et de l'identité de ses produits de désintégration. Une fois les vertex des deux B^0 déterminés, on utilise leur séparation le long de l'axe du faisceau pour déterminer le temps Δt écoulé entre leurs désintégrations, utilisé ensuite pour la mesure de l'asymétrie dépendante du temps.

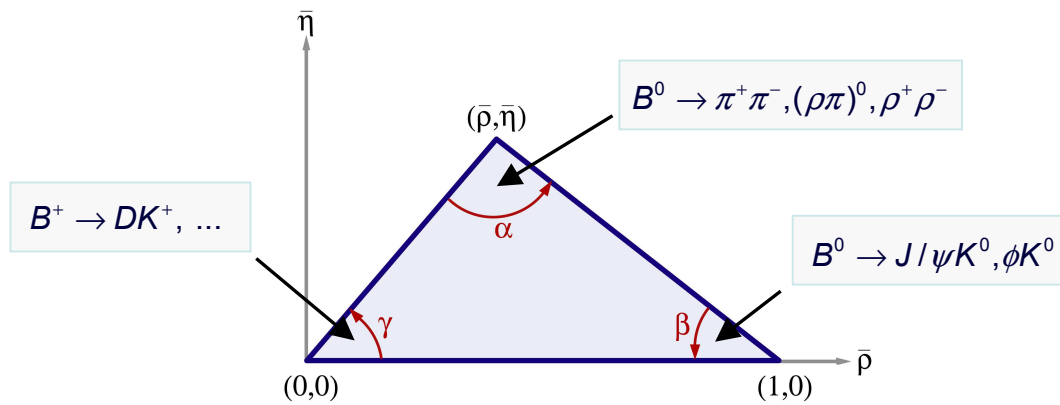


Exemple d'un événement analysé par BABAR. Le méson B^0 qui produit la désintégration cherchée – ici $J/\Psi K_s$, le mode « en or » de la mesure de $\sin(2\beta)$ – est entièrement reconstruit. La saveur de l'autre méson (B^0 ou \bar{B}^0) est déterminée par la charge de ses produits de désintégration ; comme on connaît l'évolution temporelle de l'oscillation $B^0 \leftrightarrow \bar{B}^0$, on peut alors remonter par le phénomène EPR à la saveur du méson reconstruit lors de sa désintégration, qu'elle ait eu lieu avant ou après celle du méson d'étiquetage. Enfin, dans les analyses dépendantes du temps – comme la mesure de $\sin(2\beta)$ – la distance (signée) Δz entre les désintégrations permet de déterminer le Δt utile pour la mesure de l'évolution de l'asymétrie.

Découverte de la violation de CP dans le système des mésons B

Reprenons la représentation géométrique développée précédemment : dans le cas où CP est effectivement violée, les 6 triangles d'unitarité ont tous une surface non nulle et leurs aires sont même *égales*. Ainsi, il suffit d'étudier l'un des triangles pour démontrer (ou infirmer) la violation de CP ! Le triangle d'unitarité qui intervient dans le système des mésons B est particulièrement intéressant car, comme le prédit le Modèle Standard, ses côtés sont de tailles similaires, ce qui facilite l'observation des phénomènes de violation de CP. Les effets violant CP sont de même ordre de grandeur que ceux qui respectent cette symétrie. Au contraire, le triangle décrivant le système des kaons est beaucoup plus « allongé » et les manifestations observables de violation de CP sont petites.

Les analyses de physique cherchent à sur-contraindre le triangle d'unitarité du système des mésons B en mesurant aussi bien ses côtés que ses angles – appelés α , β et γ par convention. Le fait d'avoir beaucoup plus de quantités mesurées que d'inconnues permet d'obtenir une détermination précise des paramètres CKM par une analyse combinée des différents résultats, individuellement entachés d'incertitudes plus ou moins importantes.

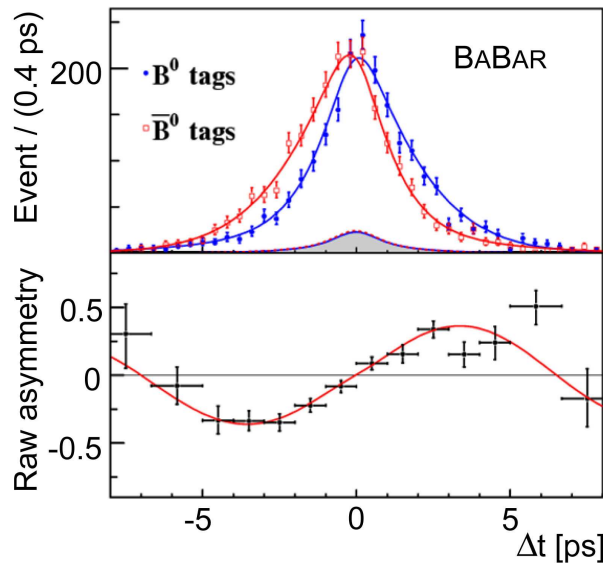


Triangle d'unitarité associé à la violation de CP dans le système des mésons B. Par une simple transformation dans le plan complexe, on peut placer deux des sommets du triangle sur l'axe réel, aux points de coordonnées (0,0) et (1,0). Si la symétrie CP est violée, le troisième sommet ($\bar{\rho}, \bar{\eta}$) est nécessairement hors de cet axe ; déterminer sa position avec précision est l'objectif des expériences étudiant la violation de CP dans le système des mésons B. Les principaux processus utilisés pour mesurer les angles α , β et γ sont présentés sur la figure.

Au moyen du mécanisme KM, le Modèle Standard prévoit une violation de CP pour le mode $B^0 \rightarrow J/\Psi K_S$. Celle-ci se traduit par une asymétrie entre les nombres de désintégrations $B^0 \rightarrow J/\Psi K_S$ et $B^0 \rightarrow J/\Psi \bar{K}_S$ qui dépend analytiquement de Δt . L'un des coefficients de cette fonction est directement $\sin(2\beta)$. Sa valeur est obtenue par ajustement du modèle sur les données. Les deux expériences BABAR et Belle ont présenté cette découverte lors des conférences d'été en 2001 ; depuis, leurs résultats sont améliorés chaque année et sont en très bon accord mutuel. La valeur actuelle est : $\sin(2\beta) = 0,725 \pm 0,037$ (résultats combinés de BABAR et Belle, été 2004).

Expérience	BABAR	Belle
Valeur de $\sin(2\beta)$ mesurée (été 2004)	$0,722 \pm 0,040 \pm 0,023$	$0,728 \pm 0,056 \pm 0,023$

Valeurs de $\sin(2\beta)$ présentées par les expériences BABAR et Belle à la conférence ICHEP 2004 à Pékin. La première incertitude est statistique tandis que la deuxième est systématique.



Ajustement sur l'asymétrie dépendante du temps obtenu à partir des données 2004 de BABAR. La dépendance temporelle est bien visible, ce qui explique la précision atteinte sur la quantité $\sin(2\beta)$.

Il convient de souligner ici que la valeur expérimentale de $\sin(2\beta)$ est parfaitement compatible avec la prédiction du Modèle Standard, basée sur les mesures des côtés du triangle d'unitarité : $\sin(2\beta) = 0,73 \pm 0,13$. En supposant valide ce cadre théorique – hypothèse confirmée par les observations *directes* de BABAR et Belle – ce résultat s'interprétait déjà comme une mise en évidence *indirecte* de la violation de CP dans le système des mésons B.

La mesure de $\sin(2\beta)$ démontre que le mécanisme KM du Modèle Standard est la source principale de la violation de CP dans le secteur électrofaible. L'aire mesurée du triangle d'unitarité est $(1,5 \pm 0,2) \times 10^{-5}$, valeur très petite par rapport au maximum permis par la théorie : $1/12\sqrt{3} \approx 0,05$. Dans la Nature, la violation de CP est donc petite.

La découverte de la violation de CP directe dans le système des mésons B

Avant l'été dernier, aucune violation de CP directe (violation de CP dans la désintégration) n'avait pu être établie dans le secteur des mésons B. Les violations de CP mesurées venaient toujours d'interférences entre désintégrations avec ou sans mélange. En effet, dans le cadre du Modèle Standard, les violations directes de CP à des niveaux significatifs ne sont attendues que dans des processus rares¹⁴ dont l'étude précise nécessite l'enregistrement d'un très grand nombre d'événements. Jusqu'à récemment, le manque de statistique disponible était le principal obstacle pour ce type de mesure, tant pour BABAR que pour Belle.

¹⁴ La relation entre désintégrations rares et violations de CP dans la désintégration est plus basée sur une constatation empirique que sur une démonstration rigoureuse. Pour avoir une violation de CP directe significative, il est nécessaire d'avoir une compétition entre plusieurs processus ayant le même état final. Dans les canaux les plus fréquents, un seul processus domine largement tous les autres.

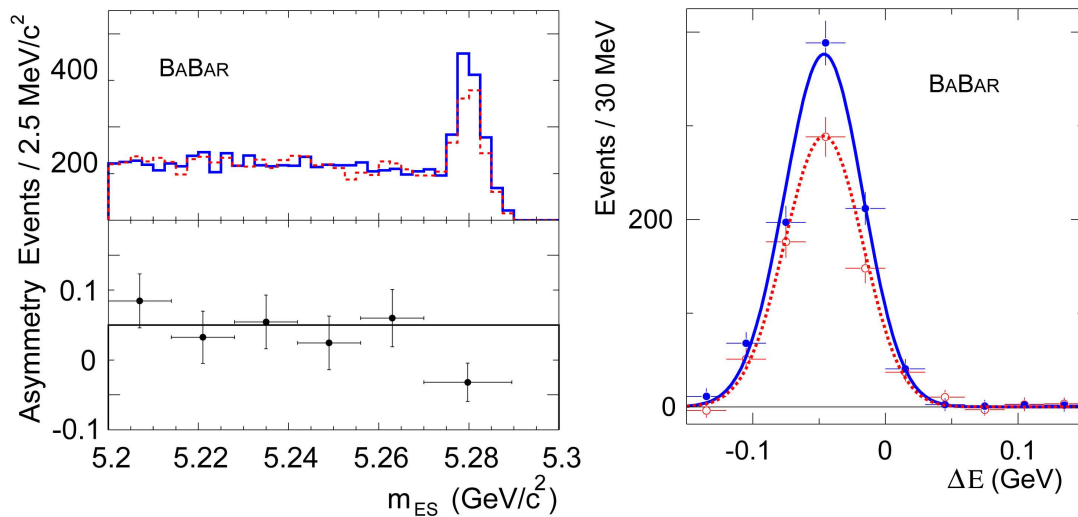
À l'été 2004, l'accumulation d'un nombre suffisant d'événements a permis la comparaison précise de la désintégration $B^0 \rightarrow K^+\pi^-$ et de son canal CP conjugué $B^0 \rightarrow K^-\pi^+$. Dans ce cas-là, on est en présence d'états spécifiques de saveur : les désintégrations $B^0 \rightarrow K^+\pi^-$ et $B^0 \rightarrow K^-\pi^+$ n'existent pas ! Cette propriété facilite l'analyse : en mesurant la charge du kaon dans l'état final, on sait tout de suite quel méson s'est désintégré et l'on n'a pas besoin de reconstruire la saveur de l'autre B ou de faire une analyse dépendante du temps. Néanmoins, l'étude reste difficile car ces canaux de désintégration sont très rares : pour BABAR, il a fallu sélectionner moins de 2000 événements sur un total supérieur à 200 millions !

La quantité mesurée par BABAR et Belle est l'asymétrie (« A_{CP} ») entre les taux de désintégration (désignés par la lettre grecque « Γ ») des deux saveurs. En combinant BABAR et Belle on obtient :

$$A_{CP} = \frac{\Gamma(\bar{B}^0 \rightarrow K^-\pi^+) - \Gamma(B^0 \rightarrow K^+\pi^-)}{\Gamma(\bar{B}^0 \rightarrow K^-\pi^+) + \Gamma(B^0 \rightarrow K^+\pi^-)} = -0.109 \pm 0.019$$

Expérience	BABAR	Belle
Valeur de A_{CP} mesurée (été 2004)	$-0.133 \pm 0.030 \pm 0.009$	$-0.101 \pm 0.025 \pm 0.005$

Valeurs de A_{CP} présentées par les expériences BABAR et Belle à la conférence ICHEP 2004 à Pékin. La première incertitude est d'origine statistique tandis que la deuxième est systématique.



Deux manières de voir la différence entre les processus étudiés $B^0 \rightarrow K^+\pi^-$ et $B^0 \rightarrow K^-\pi^+$. Sur chaque graphique, le nombre d'événements identifiés par canal est porté en fonction d'une variable discriminante (la masse reconstruite du B à gauche (m_{ES}) et la différence entre l'énergie reconstruite du B et l'énergie attendue à droite (ΔE)), permettant de séparer le signal cherché des désintégrations parasites. Dans les deux cas, on note un clair excès d'événements $B^0 \rightarrow K^+\pi^-$ (en bleu) par rapport à $B^0 \rightarrow K^-\pi^+$ (en rouge) : c'est la violation de CP directe. Sur la figure de gauche, le signal est concentré dans la partie « piquée » des courbes, la partie « plate » correspondant au « bruit de fond ». À droite, ce bruit de fond a été soustrait et seuls les événements « signal » sont représentés.

Le processus $B^0 \rightarrow K^+\pi^-$ a donc lieu plus souvent que l'anti-processus $B^0 \rightarrow K^-\pi^+$ (son taux est environ 11% plus élevé en relatif). L'erreur sur cette asymétrie est plus de 5 fois plus faible que la valeur mesurée, ce qui authentifie la découverte¹⁵ de la violation de CP directe. L'effet observé est environ 100 000 fois plus important que dans le secteur des kaons neutres.

Si ce résultat confirme le mécanisme KM, il est difficile de l'exploiter pour remonter à des paramètres fondamentaux du Modèle Standard, comme par exemple les angles du triangle d'unitarité : les erreurs théoriques sont importantes dans ces processus rares. Néanmoins, dans le futur, un grand nombre de modes devraient à leur tour exhiber une violation de CP directe, une fois que le nombre de désintégrations enregistrées par BABAR et Belle sera suffisant pour permettre leur étude.

Le même problème existe pour l'interprétation théorique de la violation de CP directe observée dans le système des kaons : il trouve son origine dans la nature du phénomène. En effet, la prise en compte des interférences entre plusieurs amplitudes dotées de phases faibles *et fortes différentes* rend problématique des prédictions théoriques fiables. Pour s'affranchir au maximum des modèles, on utilise des propriétés de symétrie entre différents modes de désintégrations impliquant les mêmes particules dans l'état final mais avec des charges différentes – par exemple $B^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$, $B^0 \rightarrow \pi^0\pi^0$ et $B^+ \rightarrow \pi^+\pi^0$. Ces méthodes, dites « d'isospin » du nom de la transformation qui relie ces différents processus, nécessitent un grand nombre d'événements pour être efficaces. Ainsi, comme les performances des usines à B PEP-II et KEKB s'améliorent et que la statistique disponible augmente, de plus en plus de résultats basés sur ces approches seront publiés dans un futur proche.

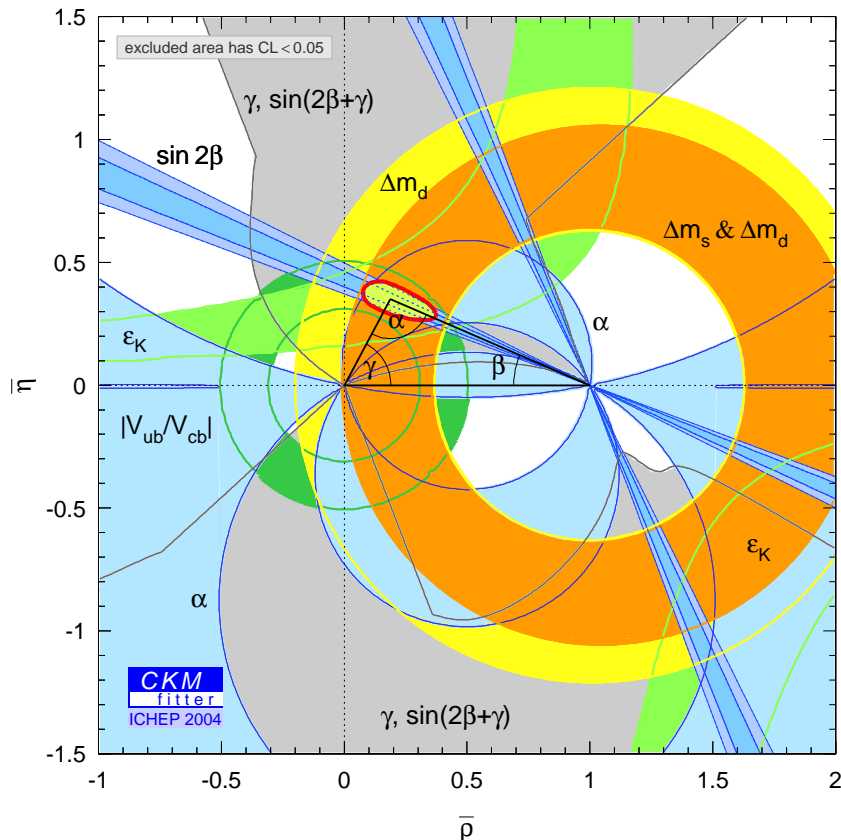
Le futur de la recherche de la violation de CP

Aujourd'hui, les prédictions du Modèle Standard et de la matrice CKM portant sur la violation de CP sont en très bon accord avec les mesures expérimentales. Le nombre d'observables étudiées et la précision des résultats augmentent sans cesse : ainsi, l'angle α a été mesuré pour la première fois cet été par BABAR à $\alpha = (100 \pm 10)^\circ$ utilisant les désintégrations B en $\pi\pi$, $\rho\pi$ et $\rho\rho$, et les premiers jalons ont été posés sur la route menant à l'angle γ , le plus difficile à obtenir.

Néanmoins, il existe des modes poétiquement appelés « pingouins », très sensibles à des effets au-delà du Modèle Standard pour lesquels les valeurs mesurées de la quantité équivalente au $\sin(2\beta)$ du mode $B^0 \rightarrow J/\Psi K_S$ sont en désaccord avec les prédictions du Modèle Standard. L'écart n'est pas suffisamment significatif pour constater la présence d'une faille théorique. Dans les prochaines années, les mises à jour des résultats actuels devraient permettre d'infirmer ou non la présence de nouvelle physique (l'Arlésienne actuelle de la physique des particules !) dans ces canaux de désintégration.

¹⁵ En effet, une règle implicite, communément acceptée en physique des particules, veut qu'un résultat nouveau ne soit présenté comme une *découverte* que si sa signification statistique est suffisante, c'est-à-dire si la probabilité que la mesure soit entièrement due au hasard est très faible. En supposant que la valeur attendue en l'absence du phénomène identifié soit nulle, l'estimation de la confiance que l'on a dans une mesure se fait simplement en divisant la valeur mesurée par l'erreur ; on obtient alors un « nombre d'écart-types (un nombre de σ) ». Même le vocabulaire est codifié : à « 3σ » (probabilité de fluctuation statistique 0.27 %), on parle « d'indication », à « 4σ » (probabilité 6.3×10^{-3} %), « de forte indication » et à partir de « 5σ » (probabilité $\leq 5.7 \times 10^{-5}$ %) d'une « découverte ».

Les usines à B espèrent au moins quadrupler leur statistique d'ici cinq ans et ainsi rester compétitives en face de nouvelles expériences comme LHCb au CERN (collisions proton-proton) et peut-être BTeV à Fermilab (collisions proton-antiproton). Ces détecteurs chercheront bien sûr à confirmer les mesures des « usines à B ». Ils s'intéresseront également à un autre type de méson B (le B_s , formé d'un quark b et d'un quark s alors que le B^0 est lui fait d'un quark b et d'un quark d) que BABAR et Belle ne peuvent pas étudier car ils ne sont pas produits dans les « usines à B » aux énergies actuelles. On s'attend à une forte complémentarité entre toutes ces expériences.



Le diagramme ci-dessus illustre le phénomène de sur-contrainte du triangle d'unitarité associé au système des mésons B – on le distingue au centre de la figure avec ses trois angles α , β et γ en évidence. Chaque bande colorée correspond à une analyse différente et son épaisseur rend compte de l'incertitude. Les sept résultats ici présents apparaissent en accord et délimitent (en rouge) une zone réduite du plan $(\bar{\epsilon}, \bar{\epsilon})$ en forme de « haricot » qui contient sans doute le sommet du triangle.

On commence également à réfléchir à une « super usine à B » qui serait construite soit à SLAC soit à KEKB et dont l'objectif serait de collecter environ cinquante fois plus de données à la résonance $\Upsilon(4S)$ que la première génération d'usines à B. Ainsi, des modes extrêmement rares pourraient être étudiés, afin de tester le Modèle Standard dans ses ultimes limites.

Ces expériences, actuelles comme futures, visent toutes à améliorer notre compréhension de la violation de la symétrie CP dans le secteur des quarks. Même si on peut aujourd'hui mettre ce phénomène en évidence, y compris dans des désintégrations très rares, on ignore si son origine est accidentelle – c'est-à-dire s'il existe simplement parce que la théorie ne l'interdit pas – ou bien s'il est relié à la baryogénèse par un mécanisme encore inconnu. Si le Modèle Standard décrit très bien les phénomènes de violation de CP découverts jusqu'à maintenant, la plupart des théoriciens pensent

aujourd'hui qu'il ne peut pas rendre compte de l'asymétrie matière-antimatière générée lors des premiers instants de l'Univers. En particulier, l'origine de l'excès de matière reste un mystère. En effet, on observe un baryon pour un milliard de photons dans l'Univers ; si l'on suppose que ces derniers proviennent tous d'annihilation matière-antimatière, la différence initiale apparaît vraiment minime : 1 000 000 001 baryons pour 1 000 000 000 antibaryons ! Et pourtant, cette asymétrie demande une violation de CP bien plus importante que celle que le Modèle Standard permet. Une nouvelle physique, encore inconnue, se cache sûrement là-dedans.

Où la chercher ? Peut-être du côté des neutrinos, ces particules mystérieuses très difficiles à étudier car elles sont très faiblement couplées à la matière. Récemment, on a montré que les neutrinos avaient une masse, probablement infime – mais certainement non nulle – en mettant en évidence des phénomènes d'oscillation¹⁶ entre leurs trois saveurs (neutrinos électron, muon et tau). Or, dans le Modèle Standard, les neutrinos sont sans masse : on est donc en présence d'un phénomène que la théorie actuelle ne décrit pas et dont la compréhension nécessite un cadre plus large.

Cette découverte ouvre de nouvelles perspectives. On peut avoir dans le secteur des neutrinos une situation analogue à celle des quarks, à savoir des états propres de masse différents des états spécifiques de saveur. Ces deux états de neutrinos sont alors reliés par une matrice unitaire 3×3 , historiquement appelée U_{PMNS} (en l'honneur des quatre physiciens Pontecorvo, Maki, Nakagawa et Sakata). Si elle possède une phase complexe non nulle, alors CP est également violée pour les neutrinos. En pratique, un tel effet se traduirait directement par une différence entre les transitions $\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta$ et $\bar{\nu}_\alpha \rightarrow \bar{\nu}_\beta$ où α et β sont deux saveurs différentes de neutrinos. Enfin, la manière la plus simple du point de vue théorique de conférer une masse aux neutrinos est de supposer l'existence d'autres neutrinos, très lourds. La désintégration de ces particules est susceptible de créer un excès de matière au travers d'un mécanisme appelé leptogénèse ; celui-ci pourrait ainsi expliquer la... baryogénèse !

¹⁶ Les neutrinos changent de saveur au cours de leur propagation : un neutrino initialement électron peut se retrouver avec une saveur muonique un peu plus tard, avant de redevenir un ν_e ensuite etc. Les lois de probabilité gouvernant ces transitions sont prédictibles théoriquement et parfaitement en accord avec les observations expérimentales.